

核融合炉超伝導マグネットの剛性予測手法の開発とその構造設計への適応に関する研究

著者	笠場 孝一
号	1652
発行年	1994
URL	http://hdl.handle.net/10097/6925

氏 名	笠 場 孝 一
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 7 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学第二専攻
学 位 論 文 題 目	核融合炉超伝導マグネットの剛性予測手法の開発と その構造設計への適用に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 庄子 哲雄
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学教授 高橋 秀明 東北大学教授 坂 真澄 東北大学教授 進藤 裕英

論 文 内 容 要 旨

緒 言

現在世界のエネルギーの9割近くが石油, 石炭, 天然ガスによって供給されている。そしてそのような化石燃料によるエネルギー環境問題が深刻化するにつれ, また21世紀にはその消費量が現在の3倍になるといわれているエネルギーの供給に備え, 代替エネルギーを求める声は以前に増して大きい。その中にあって核融合が果たせる役割には大きなものがあると期待されている。

核融合開発によって, 無尽蔵な究極のエネルギーが実現すると言われている。1つに硫酸化物や窒素酸化物, 二酸化炭素などの大気汚染物質を排出しない, そしてもう1つは, 無限に存在する海水中の重水(重水素)を利用するため, そのエネルギー量は人類が消費するであろうエネルギー

核融合炉超伝導マグネットの剛性予測手法の開発とその構造設計への適用に関する研究

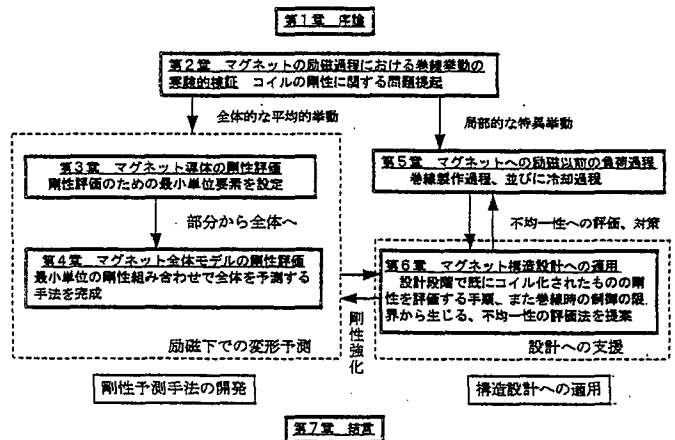


図1 研究の流れ

量の数百億年分に相当するからである。高温プラズマの反磁性を利用して、それを磁界により閉じ込め、加熱することにより核融合反応を起こさせるには幾つかの方法があるが、現在エネルギープラントとしての方向付けをもってその開発が進行しているものに、トカマク方式とヘリカル方式がある。プラズマを磁界で閉じ込めるそれら方式では大空間に発生する強磁界が必要となり、その実現にはエネルギーの効率の面からジュール損失のない超伝導マグネットが不可欠となる。そのマグネットについては使用される環境が高電流、高磁界であるため、導体部には巨大な電磁力が生じるが、各装置に要求されるマグネットの磁場精度から、磁場を生成する導体自体の変形はミリ単位のレンジで制限される。よってマグネットに対する剛性面での要求は非常に厳しいといえるが、その剛性に関する報告で、実験値において導体中に予想を上回る変位あるいはひずみが検出されている箇所があること、またコイルによっては特定の負荷方向に対する平均的な全体挙動において、計算値との間に著しい違いがあることが述べられている。つまりその決定的な評価法が現時点では存在しない。本研究では、その課題に対する剛性評価法の開発を行う。一方超伝導マグネットは巻線全体としての剛性を強化することのみで、その機械的特性に対する課題がすべて解決するものではない。巻線の局所的な挙動が導体同士のあるいは導体と絶縁物の摩擦挙動を誘発し、その発熱がマグネットの超伝導状態を崩壊させるクエンチ現象を引き起こすことがある。よってその局所的な巻線の挙動に関しても本研究において考察した。

各章結言

本研究は核融合炉超伝導マグネットの剛性予測手法の開発を目指し、またその考察を設計時にフィードバックすることを目的としている。同時にコイルの導体やその層間絶縁に生じる力、そしてコイルの安定性を解析した。以下に各章で得られた知見をまとめる。

2章では2種類のコイルの励磁実験を通し、剛性評価を行う上での問題提起を行った。この章では巻線方法、負荷履歴、導体自体の剛性、そしてひずみ挙動のばらつきに関してそれぞれ以下の知見を得た。

- (1) 巻線は励磁時の変形に対する導体への境界条件を決定するが、その影響は大きく、例えばモノリス導体密巻きモデルのソレノイドとヘリカルという巻線の違いでは導体のひずみにして約2倍の違いが生じた。
- (2) 両コイルのひずみ、変位挙動より、初期の励磁では巻線の挙動は不安定であることが分かった。しかし同じ電流値での励磁を繰り返すことで、コイル上でのエネルギー的な平衡点が決定し再現性のよい挙動となった。
- (3) マグネットシステムの剛性を導体部自身に求めるCSコイルではケーブルインコンジット(CICC)が主流になっているが、ここで比較したEXコイル導体とTJコイル導体の違いのように、どのような形状のコンジットを選択するかでマグネット全体の変形量、応力分布は大きく異なる。
- (4) コイルのひずみ挙動に関して、その全体としての平均変動に対し、局部にそれから大きく外れ

る挙動を示す箇所があった。これは電磁力の影響に局所的な片寄りが生じていることを示している。この挙動については、励磁過程のみの影響では説明がつかず、励磁過程以前の巻線や冷却の影響が関与していると思われる。

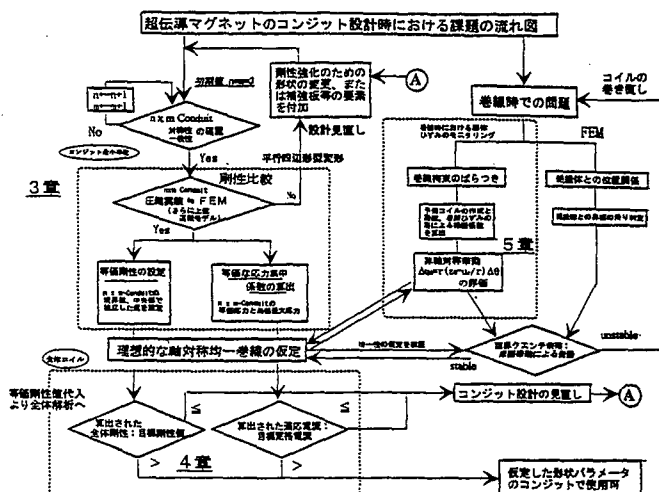
以上の2章の結果より、その後の方針として、導体（特に CICC）自身の剛性を見積もることが、そしてもうひとつには巻線過程の結果として生じるコイル内の拘束力（残留応力）を調べることがある。なおここで見られたひずみ挙動の局所的な特異性も、この巻線時に起因していると思われる。それらについて以降の章で考察を行っているが、3章ではそのうち導体自身の剛性を見積もるための手法を示した。マグネットは基本的に同じ形状を持つコンジットが重なって（巻かれて）形成され、よって基本単位は一個のコンジットであるように思われる。しかしこの章での考察により、剛性の面ではすべてが独立した並列体ではないことが明らかになった。以下に本章での結果をまとめる。

- (1) バンドル型の単体コンジットの圧縮剛性は一義的に決定できない。それは力を及ぼし合う周囲の要素の変形でそのコンジットへの負荷分布が異なるからである。
- (2) コンジットの剛性は同じ負荷条件下であっても、初期の作成時の形状不整や負荷履歴により著しく低下する。それには平行四辺形型の変形モードが関与している。比較的高剛性の構型の変形モードとの違いから、この点でもコンジットの単位での剛性値は一義的には決定できない。
- (3) 並列接続に敏感な DPC-EX コンジットの圧縮試験結果により、この種のコンジットの巻線導体部の剛性の基本単位は 3×3 -Unit にあることが分かった。その剛性を算出することで全体モデルの等価剛性の算出が可能であると思われる。

4章では3章での導体の剛性評価の結果を用い、コイル全体としての挙動を解析した。ここでとりあげたのは ITER における1つの最有力候補とされている導体を用いた2種類のコイル（CS と TF）で、剛性評価が最も困難でかつ重要視されている CS コイルの軸方向並びに、TF コイルの半径方向の考察を行った。その結果平均をとった全体挙動の傾向がこの章で示した有限要素法並びに3章で算出した等価剛性値の適用により、評価が可能であることを示した。しかし各コイルとも等価剛性に加えて内部の応力分布の重要性をここで明らかにした。

5章はここまでの励磁過程のみの解析から視点をかえて、その他のコイルへの負荷要因について考察した。2章の励磁実験において問題提起を行ったもうひとつのテーマに巻線過程の結果として生じるコイル内の拘束力（残留応力）を調べることがある。その目的のために5章では巻線で生じるコイル内の残留応力を、作成後のマグネットを解体することで行った。その結果、同一層でありながら、解体の際のひずみの解放値にばらつきが存在し、その分布傾向が励磁時のひずみ分布と関連性をもつことが分かった。また5章では CS コイルの冷却にともなう熱応力の計算について、その手法を示した。そして励磁、冷却過程の前の段階で必要とされる条件、CS コイルに作用させる締め付けボルトの最適化が可能であることを示した。

また、作成時の不均一性については巻線時の導体ひずみのモニタリングにより、その評価を行う手法を、また絶縁スペーサとの位置関係がもたらす影響についてもここでまとめた。いずれも巻線時で得られる情報から摩擦挙動を予想し、その発熱量から安定性評価を行うものである。剛性に関する考察とここでの安定性評価は巻線の均一性の検証で関わっている。剛性評価の際にはその変形挙動は平均化を行うことで局所的な不均一性は削除されるため、安定性評価はその平均化を行う際の補完的な役割を有する。よって 3×3 -Unit で決定した等価剛性を全体モデルに適用する際には、はじめに上述した安定性評価を行い、その条件を満たしていないコイルについては全体モデルで仮に高い剛性が算出されても、それは超伝導マグネット本来の機能を有しないため意味を持たないことになる。



審 査 結 果 の 要 旨

将来のエネルギー源として核融合炉への期待は大きい。本研究は核融合炉におけるプラズマ制御、クエンチ予測に不可欠な超伝導マグネットの剛性予測手法の開発とその構造設計への適用を目的としたものであり、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では2種類のコイルの励磁実験を通し、剛性評価を行う上での問題点の整理を行っている。すなわち巻線方法、負荷履歴、導体自身の剛性、そしてひずみ挙動のばらつきに関し導体自身の剛性を見積もること及び巻線過程の結果として生じるコイル内の拘束力（残留応力）の重要性を指摘している。

第3章では導体自体の剛性を見積もるための新しい評価手法を提案している。すなわちバンドル型の単体コンジットの圧縮剛性は一義的に決定できない事、そしてその原因は力を及ぼし合う周囲の要素の変形で当該コンジットへの負荷分布が異なることに依るものであることを明らかにしている。さらに並列接続に敏感な DPC-EX コンジットの圧縮試験結果により、この種のコンジットの巻線導体部の剛性の基本単位は 3×3 -unit にあること明らかにし、このようにして得られた剛性は全体モデルの等価剛性の算出に有用であることを示している。これらは重要な知見である。

第4章では第3章での導体の剛性評価の結果を用い、コイル全体としての挙動を解析し、国際熱核融合実験炉（ITER）において剛性評価が最も困難でかつ重要視されている CS コイルの軸方向並びに TF コイルの半径方向の剛性評価を行い、有限要素法並びに第3章で算出した等価剛性値の適用により評価が可能であることを示している。これは構造設計上有用な知見である。

第5章は第2章の励磁実験において問題提起を行ったもうひとつの重要な課題である巻線過程に生じるコイル内の拘束力（残留応力）を調べるため、計装化マグネットの解体過程におけるひずみ計測を行い、解体の際のひずみの解放値にばらつきが存在し、その分布傾向が励磁時のひずみ挙動の異常と関連することを明らかにした。初期不整合と励磁時の変形挙動を定量的に示した新しい知見である。

第6章は各章において得られた成果を設計へ反映させるための具体的手順を示したものであり、剛性向上、初期不整合の低減策について製造過程での具体的提案を行っている。実用上有益な提案である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、超伝導マグネットの剛性評価手法の新しい提案とそれに基づく構造設計への指針を提示するなど重要な知見を得ており、超伝導工学及び機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。